Механика

УДК 539.3

doi: 10.31429/vestnik-15-2-47-54

О ФАКТОРАХ, СНИЖАЮЩИХ ВЕРОЯТНОСТЬ СТАРТОВЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ, И ВОЗМОЖНЫХ ПОДХОДАХ ПО ИХ УПРЕЖДЕНИЮ ДЛЯ КОНЕЧНЫХ И ПОЛУБЕСКОНЕЧНЫХ ПЛИТ

Евдокимова О. В., Бабешко О. М., Бабешко В. А., Уафа С. Б., Гладской И. Б., Плужник А. В., Федоренко А. Г.

ABOUT THE FACTORS REDUCING THE PROBABILITY OF STARTING EARTHQUAKES AND POSSIBLE WAYS TO DEFLECT THEM

O. V. Evdokimova[1], O. M. Babeshko[2], V. A. Babeshko[2], S. B. Uafa[1], I. B. Gladskoy[2], A. V. Pluzhnik[1], A. G. Fedorenko[1]

[1] Southern Scientific Center, Russian Academy of Science, Rostov-on-Don, 344006, Russia
[2] Kuban State University, Krasnodar, 350040, Russia
e-mail: babeshko49@mail.ru

Abstract. On the basis of the analysis of the models characterizing the preparation of starting earthquakes for different types of stresses on tectonic plates and types of faults the analysis of earthquakes' beginning probabilities is implemented. This analysis may at the same time show ways to deflect them, i.e. to possibly reduce earthquake risk. It is determined that among the factors affecting the probability of the beginning and elimination of strong starting earthquakes there are such phenomena as ways to distribute stress on tectonic plates and ways to affect the edges of tectonic plates. Also, the probability of the beginning of starting earthquakes may be affected by peculiarities of faults' conditions, in particular the areas of "adhesion" of the faults' edges or their absence. Apart from that, the conditions of the lower, ground-contacting boundaries of tectonic plates may affect the nature of earthquakes.

Keywords: block element, factorization, topology, integral and differential factorization methods, exterior forms, block structures, boundary problems, singular peculiarity.

1. Постановка задачи

Считаем, что покрытие, лежащее на деформируемом основании, представляет собой пластину Кирхгофа, имеющую несколько типов разломов: бесконечный, разделяющий пластину на две полубесконечныечасти, называемые ради краткости, плитами; полубесконечный, когда разлом представляет полубесконечную трещину; конечный, когда разлом является конечной трещиной; совокупность чередующихся зон разделенных берегов разломов и зоны «слипшихся» берегов.

Евдокимова Ольга Владимировна, д-р физ.-мат. наук, главный научный сотрудник Южного научного центра РАН; e-mail: evdokimova.olga@mail.ru.

Бабешко Ольга Мефодиевна, д-р физ.-мат. наук, главный научный сотрудник научно-исследовательского центра прогнозирования и предупреждения геоэкологических и техногенных катастроф Кубанского государственного университета; e-mail: babeshko49@mail.ru.

Бабешко Владимир Андреевич, академик РАН, д-р физ.-мат. наук, зав. кафедрой математического моделирования Кубанского государственного университета, директор Научно-исследовательского центра прогнозирования и предупреждения геоэкологических и техногенных катастроф Кубанского государственного университета, заведующий лабораторией Южного федерального университета; e-mail: babeshko41@mail.ru.

Уафа Самир Баширович, младший научный сотрудник Южного научного центра РАН; e-mail: uafa70@mail.ru.

Гладской Игорь Борисович, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник Научно-сследовательского центра прогнозирования и предупреждения геоэкологических и техногенных катастроф Кубанского государственного университета; e-mail: i.glad@list.ru.

Плужник Андрей Валерьевич, младший научный сотрудник Южного научного центра РАН; e-mail: infocenter@kubsu.ru.

Федоренко Алексей Григорьевич, канд. физ.-мат. наук, младший научный сотрудник Южного научного центра РАН; e-mail: afedorenko@mail.ru.

Отдельные фрагменты работы выполнены в рамках реализации Госзадания на 2018 г., проекты (9.8753.2017/8.9), (01201354241), программ президиума РАН I-16, (00-18-21), I-52 проект (00-18-29), и при поддержке грантов РФФИ (16-41-230214), (16-41-230218), (16-48-230216), (17-08-00323), (18-08-00465), (18-01-00384), (18-05-80008).

Рассматривается также случай, когда одна из плит имеет конечную длину в направлении, перпендикулярном разлому, с параллельными границами. В тех случаях, когда берега разломов не смыкаются, имеют место два их положения: 1) расстояние между плитами отлично от нуля; 2) плиты соприкасаются. В первом случае берега литосферных плит удалены друг от друга на расстояние 2θ и находятся на линейно деформируемом основании. Считаем, что поверхность между берегами разломасвободна от напряжений, а на торцах плит действуют внешние силы, направленные по правилу внешних векторов.Граничные задачи рассматриваются в системе координат $x_1x_2x_3$ с началом в плоскости x_1x_2, совпадающей со срединной плоскостью пластины, осью ox_3, направленной вверх по нормали к пластине, осью ox_1, направленной по касательной к границе разлома, осью ox_2 — по нормали к его границе. Область, занятая левой от разлома плитой, обозначается индексом λ и описывается соотношениями $|x_1| \leqslant \infty$, $x_2 \leqslant -\theta$, а занятая правой — индексом r и координатами $|x_1| \leqslant \infty$, $\theta \leqslant x_2$. В том случае, когда одна из плит имеет конечную протяженность в направлении оси x_2, считаем, что это правая плита, описываемая соотношением$|x_1| \leqslant \infty$, $\theta \leqslant x_2 \leqslant$ с. Ограничимся случаем лишь вертикальных воздействий на пластины, считая, что на торцах могут задаваться отличные от нуля изгибающие моменты и перерезывающие силы. Уравнение Кирхгофа для фрагментов bплит, $b = \lambda, r$, занимающих области Ω_b с границами $\partial\Omega_b$, при указанных вертикальных статических воздействиях напряжением t_{3b} сверху и g_{3b} снизу имеет вид [1–3]

$$\mathbf{R}_b(\partial x_1, \partial x_2)u_{3b} + \varepsilon_{53b}(t_{3b} - g_{3b}) \equiv$$
$$\equiv \left(\frac{\partial^4}{\partial x_1^4} + 2\frac{\partial^2}{\partial x_1^2}\frac{\partial^2}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^4}{\partial x_2^4}\right) u_{3b} + \varepsilon_{53b}(t_{3b} - g_{3b}) = 0,$$

$$\mathbf{R}_b(-i\alpha_1, -i\alpha_2)U_{3b} \equiv R_b(-i\alpha_1, -i\alpha_2)U_{3b} \equiv (\alpha_1^2 + \alpha_2^2)^2 U_{3b},$$

$$U_{3b} = \mathbf{F_2}u_{3b}, \quad G_{3b} = \mathbf{F}_2 g_{3b}, \quad T_{3b} = \mathbf{F}_2 t_{3b} \quad b = \lambda, r, \tag{1.1}$$

$$D_b = \frac{E_b h_b^3}{12(1 - \nu_b^2)},$$

$$\varepsilon_{53b} = \frac{(1 - \nu_b^2)12\mathrm{H}^4}{E_b h_b^3}\varepsilon_6^{-1} = \frac{(1 - \nu)H}{\mu}.$$

Связь между граничными напряжениями и перемещениями на поверхности упругой среды, на которой находятся плиты, дается соотношениями

$$u_{3m}(x_1, x_2) = \varepsilon_6^{-1}\sum_{n=1}^{2}\iint_{\Omega_n} k(x_1 - \xi_1, x_2 - \xi_2) \times g_{3n}(\xi_1, \xi_2)\, \mathrm{d}\xi_1\, \mathrm{d}\xi_2,$$

$$x_1, x_2 \in \Omega_m, \quad m = \lambda, r, \theta,$$
$$\Omega_\lambda(|x_1| \leqslant \infty;\ x_2 \leqslant -\theta),$$
$$\Omega_r(|x_1| \leqslant \infty;\ \theta \leqslant x_2),$$
$$\Omega_\theta(|x_1| \leqslant \infty;\ -\theta \leqslant x_2 \leqslant \theta), \quad n = \lambda, r,$$

$$k(x_1, x_2) = \frac{1}{4\pi^2}\int_{-\infty}^{\infty}\int K(\alpha_1, \alpha_2)e^{-i\langle\alpha, \mathbf{x}\rangle}\, \mathrm{d}\alpha_1\, \mathrm{d}\alpha_2,$$

$$u_{3m}(x_1, x_2) = \frac{1}{\varepsilon_6 4\pi^2}\int_{-\infty}^{\infty}\int K(\alpha_1, \alpha_2 G(\alpha_1, \alpha_2) \times e^{-i\langle\alpha, \mathbf{x}\rangle}\, \mathrm{d}\alpha_1\, \mathrm{d}\alpha_2.$$

$K(\alpha_1, \alpha_2)$ — аналитическая функция двух комплексных переменных α_k, в частности мероморфная, ее многочисленные примеры приведены в [4,5]; M_b и Q_b — изгибающий момент и перерезывающая сила в системе координат x_1ox_2 соответственно; h_b — толщины пластин, H — размерный параметр подложки, например, толщина слоя; E_b — модули Юнга плиты, ν_b — ее коэффициент Пуассона. Обозначения заимствованы из [1], $\mathbf{F}_2 \equiv \mathbf{F}_2(\alpha_1, \alpha_2)$ и $\mathbf{F}_1 \equiv \mathbf{F}_1(\alpha_1)$ двумерный и одномерный операторы преобразования Фурье соответственно.

2. Метод исследования

Рассматривая плиты и основание (1.1) как блочную структуру, состоящую из трех деформируемых блоков, применим для ее исследования метод блочного элемента. Этот метод, как описано в [6], предполагает как первый шаг погружение средствами внешней алгебры граничной задачи в топологическую структуру. В результате строится функциональное уравнение граничной задачи для блочной структуры. Многошаговый алгоритм дальнейших исследований функционального уравнения, уже не имеющих никакого отношения к аппарату внешней алгебры, назван авторами внешним анализом в теории блочного элемента [6]. Он включает дифференциальную факторизацию матриц-функций с элементами из нескольких комплексных переменных, реализацию.автоморфизма, состоящую. в вычислении форм-вычетов Лере, либо неполных функциональных уравнений Винера–Хопфа, построение псевдодифференциальных уравнений, извлечение из них интегральных уравнений, диктуемых конкретными граничными условиями краевой задачи, решение интегральных уравнений и получение интегрального представления граничной задачи в каждом блоке в форме «упакованного» блочного элемента. Наконец, «склейка» решений каждого блока, состоящая в построении фактор-топологии некоторых топологических пространств, являющихся декартовыми произведениями топологических пространств носителей и решений. Применяя этап внешней алгебры, функциональное уравнение граничной задачи запишем в виде

$$R_b(-i\alpha_1,-i\alpha_2)U_{3b}\equiv(\alpha_1^2+\alpha_2^2)^2U_{3b}= \\ =-\int\limits_{\partial\Omega_b}\omega_b-\varepsilon_{53b}S_{3b}(\alpha_1,\alpha_2), \quad (2.1)$$

$$S_{3b}(\alpha_1,\alpha_2)=\mathbf{F}_2(\alpha_1,\alpha_2)(t_{3b}-g_{3b}),$$

$$b=\lambda,r.$$

Здесь ω_b — участвующие в представлении внешние формы [1, 3] с учетом выбора системы координат, имеющие вид

$$\omega_b\,(x_1,x_2)=e^{i\langle\alpha,x\rangle}\times \\ \times\left\{-\left[\frac{\partial^3u_{3b}}{\partial x_2^3}-i\alpha_2\frac{\partial^2u_{3b}}{\partial x_2^2}-\alpha_2^2\frac{\partial u_{3b}}{\partial x_2}+\right.\right. \\ \left.+i\alpha_2^3u_{3b}+2\frac{\partial^3u_{3b}}{\partial x_1^2\partial x_2}-2i\alpha_2\frac{\partial^2u_{3b}}{\partial x_1^2}\right]\mathrm{d}x_1+ \\ \left.+\left[\frac{\partial^3u_{3b}}{\partial x_1^3}-i\alpha_1\frac{\partial^2u_{3b}}{\partial x_1^2}-\alpha_1^2\frac{\partial u_{3b}}{\partial x_1}+i\alpha_1^3u_{3b}\right]\mathrm{d}x_2\right\},$$

$$b=\lambda,r,$$

а в частном случае прямолинейной границы представимы формулами

$$\omega_\lambda=e^{i\langle\alpha,x\rangle}\left\{-\left[i\alpha_2M_\lambda D_\lambda^{-1}-Q_\lambda D_\lambda^{-1}-\right.\right. \\ -(\alpha_2^2+\nu_\lambda\alpha_1^2)\frac{\partial u_{3\lambda}}{\partial x_2}+ \\ \left.\left.+i\alpha_2\left[\alpha_2^2+(2-\nu_\lambda)\alpha_1^2\right]u_{3\lambda}\right]\right\}\mathrm{d}x_1,$$

$$\omega_r=-e^{i\langle\alpha,x\rangle}\left\{-\left[i\alpha_2M_rD_r^{-1}-Q_rD_r^{-1}-\right.\right. \\ -(\alpha_2^2+\nu_r\alpha_1^2)\frac{\partial u_{3r}}{\partial x_2}+ \\ \left.\left.+i\alpha_2\left[\alpha_2^2+(2-\nu_r)\alpha_1^2\right]u_{3r}\right]\right\}\mathrm{d}x_1. \quad (2.2)$$

В формуле (2.1) при интегрировании, в случае плиты конечных размеров, граница $\partial\Omega_b$ правой плиты представляет собой два торца- левый и правый. Поскольку область, занятая плитой, рассматривается как топологическое многообразие с краем, то на границе вводятся локальные координаты ориентация которых согласована с ориентацией внутренности многообразия. Если дефект полубесконечный или конечный, то границей будут берега трещины с соответствующей ориентацией. Для обеспечения автоморфизма, вычислив формы-вычеты Лере [1–3] по параметру α_2, в том числе в двукратных полюсах, псевдодифференциальные уравнения граничной задачи с учетом принятых обозначений (2.2) можем представить в виде

$$\mathbf{F}_1^{-1}(\xi_1^\lambda)\left\langle-\int\limits_{\partial\Omega_\lambda}\left\{i\alpha_{2-}D_{\lambda1}^{-1}M_\lambda-D_{\lambda2}^{-1}Q_\lambda-\right.\right. \\ -(\alpha_{2-}^2+\nu_\lambda\alpha_1^2)\frac{\partial u_{3\lambda}}{\partial x_2}+ \\ \left.+i\alpha_{2-}\left[\alpha_{2-}^2+(2-\nu_\lambda)\alpha_1^2\right]u_{3\lambda}\right\}e^{i\alpha_1x_1}\,\mathrm{d}x_1+ \\ \left.+\varepsilon_{53\lambda}S_{3\lambda}(\alpha_1,\alpha_{2-})\right\rangle=0,$$

$$\alpha_{2-}=-i\sqrt{\alpha_1^2},\quad \xi_1^\lambda\in\partial\Omega_\lambda,$$

$$\mathbf{F}_1^{-1}(\xi_1^\lambda)\left\langle -\int\limits_{\partial\Omega_\lambda}\left\{iD_{\lambda 1}^{-1}M_\lambda - 2\alpha_{2-}\frac{\partial u_{3\lambda}}{\partial x_2}+\right.\right.$$
$$\left.+\,i\left[3\alpha_{2-}^2+(2-\nu_\lambda)\alpha_1^2\right]u_{3\lambda}\right\}e^{i\alpha_1 x_1}\,\mathrm{d}x_1+$$
$$\left.+\,\varepsilon_{53\lambda}S'_{3\lambda}(\alpha_1,\alpha_{2-})\right\rangle = 0,$$

$$\xi_1^\lambda\in\partial\Omega_\lambda,\quad \partial\Omega_\lambda=\{-\infty\leqslant x_1\leqslant\infty,\ x_2=-\theta\}.$$

Производная вычисляется по параметру α_2.

Применяя в дальнейшем этот метод, приходим к двум системам функциональных уравнений вида

$$\left[\varepsilon_{53r}(\alpha_1^2+\alpha_2^2)^{-2}+\varepsilon_6^{-1}K_1(\alpha_1,\alpha_2)\right]\times$$
$$\times\,G^+(\alpha_1,\alpha_2)=$$
$$=-\left[\varepsilon_{53\lambda}(\alpha_1^2+\alpha_2^2)^{-2}+\varepsilon_6^{-1}K_1(\alpha_1,\alpha_2)\right]\times$$
$$\times\,G^-(\alpha_1,\alpha_2)+U_{3\theta}(\alpha_1,\alpha_2)+$$
$$+\,(\alpha_1^2+\alpha_2^2)^{-2}\times$$
$$\times\left[A_\lambda k_{1\lambda 0}+B_\lambda k_{2\lambda 0}+A_r k_{1r0}+B_r k_{2r0}+\right.$$
$$\left.+\,\varepsilon_{53\lambda}T^+(\alpha_1,\alpha_2)+\varepsilon_{53r}T^-(\alpha_1,\alpha_2)\right],$$
$$\theta>0,$$

$$U_{3\theta}(\alpha_1,\alpha_2)=\int\limits_{-\infty}^{\infty}\int\limits_{-\theta}^{\theta}u_3(x_1,x_2)e^{i\langle\boldsymbol{\alpha},\mathbf{x}\rangle}\,\mathrm{d}x_1\,\mathrm{d}x_2,$$

$$\left[\varepsilon_{53r}(\alpha_1^2+\alpha_2^2)^{-2}+\varepsilon_6^{-1}K_1(\alpha_1,\alpha_2)\right]\times$$
$$\times\,G^+(\alpha_1,\alpha_2)=$$
$$=-\left[\varepsilon_{53\lambda}(\alpha_1^2+\alpha_2^2)^{-2}+\varepsilon_6^{-1}K_1(\alpha_1,\alpha_2)\right]\times$$
$$\times\,G^-(\alpha_1,\alpha_2)+$$
$$+\,(\alpha_1^2+\alpha_2^2)^{-2}\times$$
$$\times\left[A_\lambda k_{1\lambda 0}+B_\lambda k_{2\lambda 0}+A_r k_{1r0}+B_r k_{2r0}+\right.$$
$$\left.+\,\varepsilon_{53\lambda}T^+(\alpha_1,\alpha_2)+\varepsilon_{53r}T^-(\alpha_1,\alpha_2)\right],$$
$$\theta=0,$$

Здесь A_λ, B_λ, A_r, B_r — выражения сложного вида, которые ради краткости опущены. Заметим, что представленные функциональные уравнения в качестве неизвестных имеют не только функции $G^+(\alpha_1,\alpha_2)$, $G^-(\alpha_1,\alpha_2)$, но также и функционалы $G^+(\alpha_1,\alpha_{2+})$, $G^-(\alpha_1,\alpha_{2-})$, $G^+(\alpha_1,\alpha_{2+})$, $G^{-\prime}(\alpha_1,\alpha_{2-})$, которые линейно входят в $k_{1\lambda 0}$, $k_{2\lambda 0}k_{1r0}$, k_{2r0} и нуждаются в определении. Получили два разных функциональных уравнения Винера–Хопфа. Первое — обобщенное функциональное уравнение Винера–Хопфа, в связи с присутствием функции $U_{3\theta}(\alpha_1,\alpha_2)$. Оно решается изложенным в [5] обращением системы двух интегральных уравнений второго рода со вполне непрерывными в некотором пространстве непрерывных с весом функций. После преобразований система имеет вид

$$X^+-\left\{-\frac{M_1^+}{M_2^-}Y^-e^{-i2\alpha_2\theta}\right\}^+=$$
$$=\left\{\frac{1}{M_2^-}\Phi e^{-i\alpha_2\theta}\right\}^+,$$

$$Y^-+\left\{\frac{M_2^-}{M_1^+}X^+e^{i2\alpha_2\theta}\right\}^-=\left\{\frac{1}{M_1^+}\Phi e^{i\alpha_2\theta}\right\}^-,$$
$$M_1=M_1^+M_1^-,\quad M_2=M_2^+M_2^-,$$
$$M_2^+G^+=X^+,\quad M_1^-G^-=Y^-,$$
$$M_1=\left[\varepsilon_{53\lambda}(\alpha_1^2+\alpha_2^2)^{-2}+\varepsilon_6^{-1}K(\alpha_1,\alpha_2)\right],$$
$$M_2=\left[\varepsilon_{53r}(\alpha_1^2+\alpha_2^2)^{-2}+\varepsilon_6^{-1}K(\alpha_1,\alpha_2)\ \right].$$

Здесь приняты обозначения работы [5].

После решения граничной задачи, определения функций $G^+(\alpha_1,\alpha_2)$ и $G^-(\alpha_1,\alpha_2)$, требуется найти значения функционалов $G^+(\alpha_1,\alpha_{2+})$ и $G^-(\alpha_1,\alpha_{2-})$, а также продифференцированные по второму параметру функционалы вида $G'_+(\alpha_1,\alpha_{2+})$, $G'_-(\alpha_1,\alpha_{2-})$. Для их определения строится система линейных алгебраических уравнений, описанная в [7].

Достаточно просто доказывается, что решение первого функционального уравнения для $\theta>0$ приводит к следующим свойствам контактных напряжений между плитами и подложкой на краях

$$g_{3\lambda}(x_1,x_2)=\sigma_{1\lambda}(x_1,x_2)(-x_2-\theta)^{-1/2},$$
$$x_2<-\theta,$$
$$g_{3r}(x_1,x_2)=\sigma_{1r}(x_1,x_2)(x_2-\theta)^{-1/2},$$
$$x_2>\theta.$$

Здесь $\sigma_{1b}(x_1,x_2)$, $b=\lambda,r$, непрерывные по обеим координатам функции для достаточно гладких t_{3b}, $b=\lambda,r$ [4, 5]. Второе функциональное уравнение является уравнением Винера-Хопфа. Обращение второго уравнения приводит при $x_2\to 0$ к следующим свойствам решений

$$g_{3\lambda}(x_1,x_2)\to\sigma_{2\lambda}(x_1,x_2)x_2^{-1},$$

$$g_{3r}(x_1, x_2) \to \sigma_{2r}(x_1, x_2) x_2^{-1}.$$

Функции $\sigma_{nb}(x_1, x_2)$, $b = \lambda, r$; $n = 2, 3$, непрерывны по обоим параметрам.

В случае конечной длины плиты в направлении оси x_2, применим методы работ [6, 7] к правой блочной плите в области $\Omega_r(|x_1| \leqslant \infty,\ \theta \leqslant x_2 \leqslant c)$. Тогда имеем псевдодифференциальное уравнение вида

$$\mathbf{F}_1^{-1}(\xi_1)\Big\langle - \int\limits_{\partial\Omega_{\theta r}} \Big\{ i\alpha_{21-} D^{-1} M_{\theta r} - D^{-1} Q_{\theta r} - (\alpha_{21-}^2 + \nu\alpha_1^2)\frac{\partial u_{3\theta r}}{\partial x_2} + i\alpha_{21-}\left[\alpha_{21-}^2 + (2-\nu)\alpha_1^2\right] u_{3\theta r} \Big\} e^{i\alpha_1 x_1}\,\mathrm{d}x_1 + \int\limits_{\partial\Omega_{cr}} \Big\{ i\alpha_{21-} D^{-1} M_{cr} - D^{-1} Q_{cr} - (\alpha_{21-}^2 + \nu\alpha_1^2)\frac{\partial u_{3cr}}{\partial x_2} + i\alpha_{21-}\left[\alpha_{21-}^2 + (2-\nu)\alpha_1^2\right] u_{3cr} \Big\} \times e^{i(\alpha_1 x_1 - \alpha_{21-} c_0)}\,\mathrm{d}x_1 + \varepsilon_{53} e^{-i\alpha_{21-} c_0} \times [G_{3r}(\alpha_1, \alpha_{21-}) - T_{3r}(\alpha_1, \alpha_{21-})] \Big\rangle = 0, \tag{2.3}$$

$$\mathbf{F}_1^{-1}(\xi_1)\Big\langle - \int\limits_{\partial\Omega_{\theta r}} \Big\{ i\alpha_{22-} D^{-1} M_{\theta r} - D^{-1} Q_{\theta r} - (\alpha_{22-}^2 + \nu\alpha_1^2)\frac{\partial u_{3\theta r}}{\partial x_2} + i\alpha_{22-}\left[\alpha_{22-}^2 + (2-\nu)\alpha_1^2\right] u_{3\theta r} \Big\} e^{i\alpha_1 x_1}\,\mathrm{d}x_1 + \int\limits_{\partial\Omega_{cr}} \Big\{ i\alpha_{22-} D^{-1} M_{cr} - D^{-1} Q_{cr} - (\alpha_{22-}^2 + \nu\alpha_1^2)\frac{\partial u_{3cr}}{\partial x_2} + i\alpha_{22-}\left[\alpha_{22-}^2 + (2-\nu)\alpha_1^2\right] u_{3cr} \Big\} \times e^{i(\alpha_1 x_1 - \alpha_{22-} c_0)}\,\mathrm{d}x_1 + \varepsilon_{53} e^{-i\alpha_{22-} c_0} \times [G_{3r}(\alpha_1, \alpha_{22-}) - T_{3r}(\alpha_1, \alpha_{22-})] \Big\rangle = 0.$$

Аналогичный вид имеет вторая группа уравнений, получающаяся из предыдущей путем замены α_{21-}, α_{22-} на α_{21+}, α_{22+}.

В подынтегральных функциях принято

$$\alpha_{21-} = -i\sqrt{(\alpha_1)^2 - \sqrt{\varepsilon_{b43}}},$$

$$\alpha_{22-} = -i\sqrt{(\alpha_1)^2 + \sqrt{\varepsilon_{b43}}},$$

$$\alpha_{21+} = i\sqrt{(\alpha_1^r)^2 - \sqrt{\varepsilon_{b43}}},$$

$$\alpha_{22+} = i\sqrt{(\alpha_1^r)^2 + \sqrt{\varepsilon_{b43}}}.$$

Уравнения для левой полубесконечной плиты остаются теми же, что были получены ранее. Анализируя построенные псевдодифференциальые уравнения для случая наличия плиты ограниченной протяженности, можно видеть увеличение числа неизвестных, порождаемых дополнительной границей по сравнению со случаем единственной границы у полуограниченной плиты. Исследования этого случая показывают, что наличие у плиты еще одной границы не изменяет типа особенностей как в случае удаленности берегов разлома, так и при сближении, однако влияет на значения коэффициентов при особенностях.

3. Полуограниченные и ограниченные разломы

Дальнейшие исследования позволили установить, что полубесконечные по протяженности в направлении оси x_1 разломы всегда имеют сингулярные концентрации напряжений на краях плит при сближении берегов разлома, несущие опасность возникновения землетрясения. Степень разрушения уменьшается по мере сокращения размера разлома конечной длины. Степень разрушения определяется сочетаниями ряда параметров. Последнее установлено путем исследования коэффициентов при особенностях. Имеют место следующие приближенные формулы для решения краевой задачи, которые представлены структурно, без конкретизации всех параметров, в связи со сложностью представлений, которые позволяют оценить возможность решения интегральных уравнений

$$K_0(\alpha_1) = -D\left(1 + \frac{\Psi_1}{\Psi_2}\right),$$

$$\Psi_1 = B_\lambda L_-(\alpha_{2\lambda-}) + B_r L_+(\alpha_{2r+}),$$

$$\Psi_2 = (B_r L_+(\alpha_{2r+}) + B_\lambda L_-(\alpha_{2\lambda-}))- \\ - \varepsilon_6^{-1} k_\infty(\alpha_1),$$

$$D = -A_\lambda Q_\lambda(\alpha_1, -\theta) + A_r Q_r(\alpha_1, \theta), \quad \theta \geqslant 0,$$

$$G_-(\alpha_1, \alpha_2) = L_-(\alpha_2) \frac{1}{\varepsilon_6^{-1} k_\infty(\alpha_1)} K_0(\alpha_1, \alpha_2),$$

$$G_+(\alpha_1, \alpha_2) = L_+(\alpha_2) \frac{1}{\varepsilon_6^{-1} k_\infty(\alpha_1)} K_0(\alpha_1, \alpha_2),$$

$$A_\lambda(\alpha_1, \alpha_2) = -\frac{e^{-i\alpha_2\theta}}{\alpha_{2\lambda-}},$$

$$B_\lambda(\alpha_1, \alpha_2) = \frac{e^{-i(\alpha_2 - \alpha_{2\lambda-})\theta}}{\alpha_{2\lambda-}},$$

$$A_r(\alpha_1, \alpha_2) = -\frac{e^{i\alpha_2\theta}}{\alpha_{2r+}},$$

$$B_r(\alpha_1, \alpha_2) = \frac{e^{i(\alpha_2 - \alpha_{2r+})\theta}}{\alpha_{2r+}}.$$

В случае ограниченных по протяженности разломов в случае плит с разными свойствами интегральное уравнение для определения поведения перерезывающих сил приближенно имеет вид

$$\int\limits_{-\infty}^{\infty} k(x_1 - \xi) s(\xi) d\xi = \sigma_2(x_1),$$

$$-\infty \leqslant x_1 \leqslant \infty,$$

$$\frac{1}{\varepsilon_6^{-1} k_\infty(\alpha_1)} K_0(\alpha_1) = K(\alpha_1),$$

$$k(x_1) = \mathbf{F}_1^{-1}(x_1) K(\alpha_1),$$

$$D(\alpha_1) = -A_\lambda Q_\lambda(\alpha_1,0) + A_r Q_r(\alpha_1,0),$$

$$s(x_1) = \mathbf{F}_1^{-1}(x_1) D(\alpha_1).$$

Здесь

$$k_\infty(\alpha_1) = \lim |\alpha_2|^{-1} K(\alpha_1, \alpha_2), \quad |\alpha_2| \to \infty.$$

Если имеет место равенство свойств левой и правой полубесконечных плит, то есть

$$A_\lambda(\alpha_1) = A_r(\alpha_1),$$

$$\mathbf{F}_1^{-1}(x_1) Q_\lambda(\alpha_1,0) = -\mathbf{F}_1^{-1}(x_1) Q_r(\alpha_1),$$

$$-\infty \leqslant y \leqslant c_1, \quad c_2 \leqslant y \leqslant \infty,$$

тогда

$$D = \frac{1}{\alpha_{2\lambda-}(\alpha_1)} \left[Q_\lambda(\alpha_1,0) + Q_r(\alpha_1,) \right],$$

$$s_0(x_1) = \mathbf{F}_1^{-1}(x_1) \left[Q_\lambda(\alpha_1,0) + Q_r(\alpha_1,) \right],$$

$$c_1 \leqslant x_1 \leqslant c_2,$$

$$\int\limits_{c_1}^{c_2} k_1(y - \xi) s_0(\xi) \, \mathrm{d}\xi = \sigma_2(y),$$

$$c_1 \leqslant y \leqslant c_2,$$

$$k_1(x_1) = \mathbf{F}_1^{-1}(x_1) \frac{K(\alpha_1)}{\alpha_{2\lambda-}(\alpha_1)}.$$

Если же это свойство имеет место на нескольких отрезках, то интегральное уравнение представимо в виде системы интегральных уравнений вида

$$\sum_{\text{т}=1}^{P} \int\limits_{c_m}^{c_{m+1}} k_1(x_1 - \xi) s_{0m}(\xi) \, \mathrm{d}\xi = \sigma_{2p}(x_1),$$

$$c_p \leqslant x_1 \leqslant c_{p+1}, \quad p = 1, 2, \ldots, P.$$

С помощью этих интегральных уравнений можно определять степень воздействия на берега разлома, чтобы снизить или увеличить коэффициент при сингулярном члене в контактных напряжениях.

Выводы

Различные аспекты подготовки землетрясений и возможных их упреждений изложены в работах [8–17]. В настоящей работе наиболее полно охвачены все основные стороны как подготовки, так и упреждения землетрясений.Наличие зон полного слипания берегов разлома исключает в этой области стартовое землетрясение. В зонах отсутствия слипания, возможность стартового землетрясения имеется. Наличие у плиты конечной длины еще одной границы не изменяет типа особенностей как в случае удаленности берегов разлома, так и при сближении, однако влияет на значения коэффициентов при особенностях.

Таким образом, управляя подходящими нагрузками как поверхностей литосферных плит, так и торцов их границ, а также организуя слипания берегов разломов, оказывается возможным упреждать стартовые землетрясения.

Литература

1. *Бабешко В.А., Евдокимова О.В., Бабешко О.М.* К проблеме физико-механического предвестника стартового землетрясения: место, время, интенсивность // ДАН. 2016. Т. 466. № 6. С. 664–669.
2. *Бабешко В.А., Евдокимова О.В., Бабешко О.М.* О свойствах стартовых землетрясений // ДАН. 2016. Т. 467. № 5. С. 530–533.
3. *Babeshko V.A., Evdokimova O.V., Babeshko O.M.* The theory of the starting earthquake // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2016. №1. Ч. 2. С. 37–80.
4. *Ворович И.И., Александров В.М., Бабешко В.А.* Неклассические смешанные задачи теории упругости. М.: Наука, 1974. 456 с.
5. *Ворович И.И., Бабешко В.А.* Динамические смешанные задачи теории упругости для неклассических областей. М.: Наука, 1979. 320 с.
6. *Бабешко В.А., Евдокимова О.В., Бабешко О.М.* Внешний анализ в проблеме скрытых дефектов и прогнозе землетрясений // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2016. №2. С. 19–28.
7. *Babeshko V.A., Evdokimova O.V., Babeshko O.M.* On the possibility of predicting some types of earthquake by a mechanical approach // Acta Mechanica. 2018. Vol. 229. Iss. 5. P. 2163–2175. DOI: 10.1007/s00707-017-2092-0
8. *Певнев А.К.* Пути к практическому прогнозу землетрясений. М.: ГЕОС, 2003. 154 с.
9. *Reid N.F.* The Mechanism of the Earthquake. The California Earthquake of April 18, 1906. Rep. of the State Investigation Commiss. Vol. 2. Pt. 1. Washington, 1910. 56 p.
10. *Голицын Б.Б.* Избранные труды. Т. 2. М. Изд-во АН СССР, 1960. 465 с.
11. *Gutenberg B., Richter C.* Seismicity of the Earth and associated phenomena. Princeton Univ. Press, 1954. 310 p.
12. *Рихтер Ч.* Элементарная сейсмология. М.: Изд-во иностр. лит., 1963. 670 с.
13. *Гамбурцев Г.А.* Перспективный план исследований по проблеме «Изыскание и развитие прогноза землетрясений». В сб.: Развитие идей Г.А. Гамбурцева в геофизике. М.: Наука, 1982, С. 304–311.
14. *Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф.* Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. М.: Наука, 1987. 104 с.
15. *Соболев Г.А.* Основы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1993. 313 с.
16. *Кейлис-Борок В.А.* Динамика литосферы и прогноз землетрясений // Природа. 1989. № 12. С. 10–18.
17. *Алексеев А.С. и др.* Активная сейсмология с мощными вибрационными источниками. Коллективная монография. Изд-во СО РАН, 2004. 388 с.

References

1. Babeshko, V.A., Evdokimova, O.V., Babeshko, O.M. The problem of physical and mechanical precursors of earthquake: place, time, intensity. *Doklady Physics*, 2016, vol. 61, no. 2, pp. 92–97. DOI: 10.1134/S1028335816020099
2. Babeshko, V.A., Evdokimova, O.V., Babeshko, O.M. Properties of “started” earthquake. *Doklady Physics*, 2016, vol. 61, no. 4, pp. 188–191. doi: 10.1134/S1028335816040054
3. Babeshko, V.A., Evdokimova, O.V., Babeshko, O.M. The theory of the starting earthquake. *Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Cooperation*, 2016, no. 1, pt. 2, pp. 37–80.
4. Vorovich, I.I., Aleksandrov, V.M., Babeshko, V.A. *Nonclassical mixed problems in elasticity*, Nauka, Moscow, 1974. (In Russian)
5. Vorovich, I.I., Babeshko, V.A. *Dynamic mixed problems from the elasticity for nonclassical domains.* Nauka, Moscow, 1979. (In Russian)
6. Babeshko, V.A., Evdokimova, O.V., Babeshko, O.M. External analysis of the problem latent defects and the forecast of earthquakes. *Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Cooperation*, 2016, no. 2, pp. 19–28. (In Russian)
7. Babeshko, V.A., Evdokimova, O.V., Babeshko, O.M. On the possibility of predicting some types of earthquake by a mechanical approach. *Acta Mechanica*, 2018, vol. 229, iss. 5, pp. 2163–2175. DOI: 10.1007/s00707-017-2092-0
8. Pevnev, A.K. *Ways to practical forecast of earthquakes.* GEOS, Moscow, 2003. (In Russian)
9. Reid, N.F. The Mechanism of the Earthquake. In: *The California Earthquake of April 18, 1906. Rep. of the State Investigation Commiss.*, vol. 2, pt. 1. Washington, 1910.
10. Golitsyn, B.B. *Selected Works*, vol. 2, Izdatelstvo AN SSSR, Moscow, 1960. (In Russian)
11. Gutenberg, B., Richter, C. *Seismicity of the Earth and associated phenomena*, Princeton Univ. Press, 1954.
12. Richter, C. *Elementary Seismology*, Izdatelstvo inostrannoy literatury, Moscow, 1963. (In Russian)
13. Gamburtsev, G.A. Prospective plan of research on the problem “Search and development of earthquake prediction”. In: *Development of ideas Gamburtsev in geophysics*, Nauka, Moscow, 1982, pp. 304–311. (In Russian)
14. Sadovsky, M.A., Bolkhovitinov, L.G., Pisarenko, V.F. *Deformation of the geophysical environment and seismic process*, Nauka, Moscow, 1987. (In Russian)

15. Sobolev, G.A. *Basics of earthquake prediction*, Nauka, Moscow, 1993. (In Russian)
16. Keiliss-Borok, V.A. Dynamics of the lithosphere and forecast of earthquakes. *Priroda* [Nature], 1989, no. 12, pp. 10–18. (In Russian)
17. Alekseev, A.S. et al. *Active seismology with powerful vibrational sources*, Izdatelstvo SO RAN, 2004. (In Russian)

© Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества, 2018

© Евдокимова О. В., Бабешко О. М., Бабешко В. А., Уафа С. Б., Гладской И. Б., Плужник А. В., Федоренко А. Г., 2018

Статья поступила 20 июня 2018 г.